

Elastic properties of hydrous phases in the deep mantle

high-pressure ultrasonic wave velocity measurements on clinohumite and phase A

Doctoral Thesis

Author(s):

Phan, Huong T.

Publication date:

2008

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005771157>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO: 18091

Elastic Properties of Hydrrous Phases in the deep Mantle: High-Pressure Ultrasonic Wave Velocity Measurements on Clinohumite and Phase A

A dissertation submitted to
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Natural Science

presented by
HUONG T. PHAN

Master of Science in Geology,
Moscow State Geological Prospecting Academy.

born 25.11.1970
citizien of Vietnam

Accepted on the recommendation of

Prof. Peter Ulmer	ETH Zürich	examiner
Dr. Eric Reusser	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Domenico Giardini	ETH Zürich	co-examiner
PD Dr. Luigi Burlini	ETH Zürich	co-examiner
Prof. Dr. Robert C. Liebermann	SUNY, Stony Brook	co-examiner

Zürich, 2008

Abstract

The principal target of this thesis is to determine the elastic properties of dense hydrous magnesium silicate phases, namely OH-clinohumite and phase A, stable in the deeper parts of the upper mantle and in subduction zone. From the results it is possible to predict their presence in subducting slabs by seismic tomography methods. This was achieved by ultrasonic techniques under ultra-high pressure conditions in a multi-anvil apparatus.

A prerequisite for successful measurements of wave propagation velocities in a multi-anvil apparatus is the synthesis of appropriate sample specimens that satisfy strict requirements with respect to density, grain-size and homogeneity. In a series of synthesis experiments a successful strategy was developed to obtain samples with the required quality that involves a combination of solution-gelation and hot-pressing synthesis methods. Starting materials were prepared by solution-gelation of magnesium-nitrate-hexahydrate and TEOS (tetraethylorthosilane) to obtain homogeneous ultra-fine (nano-sized) powders of MgO and SiO₂. These mixtures were subsequently subjected to a 2-step recrystallization and sintering process by hot isostatic pressing to generate monomineralic aggregates of forsterite (Mg₂SiO₄), OH-clinohumite (Mg₉Si₄O₁₆(OH)₂) and phase A (Mg₇Si₂O₈(OH)₆) employing a shaking piston-cylinder and/or multi-anvil apparatus. The resulting specimens are homogeneous, with small and homogeneous grain sizes of less than 20 micrometers, free of microscopic cracks, devoid of lattice or shape preferred orientation, and with a porosity of less than 1%.

Ultrasonic wave propagation velocity measurements of forsterite and the dense hydrous magnesium silicates phases were carried out in 6/8 multi-anvil device using the transfer function method. Pulses were created by a dual Li-Niobate transducer with carrier frequencies in the range 10 to 30 MHz that generate both compressional and shear waves simultaneously. A sin(t)/t signal is propagated through the rock sample and the reflections are recorded. The travel time of the pulse through the sample combined with the known length of the sample allows direct determination of the wave velocities. Elastic moduli can be derived from the velocity information using a third-order finite-strain equation of state. Experiments have been conducted in the pressure range 1 to 11 GPa at room temperature. For OH-clinohumite, we determined the following elastic

properties: adiabatic bulk modulus $K_S = 119(2)$ GPa with its first derivative $K'_S = 4.8(1)$ and the shear modulus $G = 77(1)$ GPa with its first derivative $G' = 1.9(2)$. For phase A, the values are: $K_S = 100(1)$ GPa, $K'_S = 6.3(2)$, $G = 61(1)$ GPa, and $G' = 2.2(1)$. The experiments are reproducible and confirm that elastic velocities of polycrystalline aggregates of dense hydrous magnesium silicate phases can successfully be measured by the ultrasonic technique under subduction zone pressure condition. Measured velocities of clinohumite and phase A and their derived elastic properties were combined with literature values of other relevant (anhydrous) phases to compute seismic velocities and V_p/V_s ratios of anhydrous eclogite and anhydrous and hydrous (2 and 5 wt.% H_2O) peridotite assemblages at high pressure (up to 11 GPa) and a temperature of 1073 K. The results suggest that seismic velocities contrasts between eclogite, dry peridotite and hydrous peridotite can vary up to 5 % depending on the weight fraction of water contained in the clinohumite- or phase A-bearing peridotite assemblages. Such contrasts might, in principal, be detectable by high-resolution seismic tomography offering the possibility to diagnose the presence of hydrous phases at depth of 200-400 km in cold subduction zones. In contrast, the V_p/V_s ratio of hydrous peridotite only show small differences to eclogite and dry peridotite, and therefore, they might not be adequate to predict the presence of hydrous phases within peridotitic assemblages.

Zusammenfassung

Diese Doktorarbeit verfolgte das Ziel, elastische Eigenschaften von so genannt ´dichten Magnesio-Hydrat-Silikatphasen´ (DHMS), namentlich OH-Klinohumit und Phase A, die im tieferen Bereich des oberen Erdmantels stabil sind, unter Höchstdruck-Bedingungen zu bestimmen um den möglichen Nachweis ihrer Anwesenheit in subduzierter ozeanischer Lithosphäre mittels seismischer Tomographie zu evaluieren. Dazu wurden die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten von Ultraschallwellen bei Höchstdruck Bedingungen in einer Multi-Anvil (Vielstempel) Apparatur gemessen.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung von Schallwellenfortpflanzungs-experimenten in einer Multi-Anvil Apparatur ist die Synthese von geeigneten Proben, die strikte Anforderungen in Bezug auf Dichte, Korngrösse und Homogenität erfüllen müssen. In einer Serie von Syntheseexperimenten wurde die folgende, erfolgreiche Strategie entwickelt, die eine Kombination von Lösungs-Gelierungs- (sol-gel) und Heisspress- (hot-pressing) Methoden darstellt: Homogene, ultrafeine (Nanometer) Pulver bestehend aus MgO und SiO₂ wurden mittels der Lösung-Gelierungs-Methode aus Magnesium-Nitrat-Hexahydrat und TEOS (Tetraethylorthosilan) hergestellt. Anschliessend wurden die Pulver in einem 2-Stufen Prozess in einer schwenkbaren Piston-Zylinder (Stempel-Zylinder Presse) und Multi-Anvil Apparatur durch Heisspressen umkristallisiert und gesintert um monomineralische Aggregate von Forsterit (Mg₂SiO₄), OH-Klinohumit (Mg₉Si₄O₁₆(OH)₂) und Phase A (Mg₇Si₂O₈(OH)₆) zu erhalten. Die resultierenden Proben sind homogen mit einer geringen Korngrösse von weniger als 20 Mikrometer, enthalten keine mikroskopisch erkennbaren Brüche oder bevorzugte kristallographische oder morphologische Orientierung und weisen eine Porosität von weniger als 1 % auf.

Die Ultraschallwellenfortpflanzungsgeschwindigkeiten von Forsterite und den dichten, Magnesio-Hydrat-Silikatphasen wurden mittels der Pulstransfermethode an einer 6/8 Multi-Anvil Apparatur durchgeführt. Simultane Kompressions- und Scherwellenpulse wurden mit einem dualen Li-Niobat-Transducer (Signalumwandler) mit einer Trägerfrequenz im Bereich 10 bis 30 MHz erzeugt. Ein sint/t Signal wird durch die

Probe gesandt und die Reflektion(en) aufgezeichnet. Aus den Laufzeit differenzen und der bekannten Probenlänge erhält man direkt die Wellenfortpflanzungsgeschwindigkeit. Die elastischen Moduli erhält man aus den Geschwindigkeitsdaten durch Berechnung mittels einer 'third-order finite-strain' finite Deformations Zustandsgleichung 3. Ordnung. Experimente wurden im Druckbereich von 1 bis 11 GPa bei Raumtemperatur durchgeführt. Die folgenden elastischen Parameter wurden für OH-Klinohumit bestimmt: adiabatisches Kompressionsmodul $K_S = 119(2)$ GPa; Druckableitung des Kompressionsmoduls $K'_S = 4.8(1)$; Schermodul $G = 77(1)$ GPa; Druckableitung des Schermoduls $G' = 1.9(2)$. Für Phase A wurden die folgenden Werte bestimmt: $K_S = 100(1)$ GPa, $K'_S = 6.3(2)$, $G = 61(1)$ GPa, und $G' = 2.2(1)$. Die Experimente sind reproduzierbar und bestätigen, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit seismischer (elastischer) Wellen in polykristallinen Aggregaten von dichten, Magnesio-Hydrat-Silikatphasen unter Druckbedingungen wie sie in Subduktionszonen herrschen, erfolgreich im Labor mittels der Ultraschall-Technik gemessen werden können.

Die gemessenen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und berechneten elastischen Eigenschaften von Klinohumit und Phase A wurden mit Literaturdaten weiterer, relevanter, H_2O -freier Phasen kombiniert, um die seismische Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und V_P/V_S Verhältnisse für Eklogit- und Wasserhaltige (2 and 5 Gew.% H_2O) und Wasser-freie Peridotitparagenesen bei hohen Drücken (bis 11 GPa) und einer Temperatur von 1073 K zu berechnen. Die Resultate dieser Modelrechnungen ergeben, dass der Kontrast der seismischen Geschwindigkeiten zwischen Eklogiten, H_2O -freien und H_2O -haltigen Peridotiten bis 5% betragen kann, abhängig vom H_2O -anteil, der in den Klinohumit- oder Phase A-führenden Peridotitparagenesen gespeichert ist. Solche Unterschiede sollten mittels hochauflösender seismischer Tomographie nachweisbar sein und sollten damit die Möglichkeit bieten, die Anwesenheit von Hydratphasen in Tiefen von 200 – 400 km in kalten Subduktionszonen zu erkennen. Im Gegensatz dazu, zeigen die V_P/V_S Verhältnisse nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen möglichen H_2O -freien und H_2O -haltigen Lithologien und dürften deshalb nicht geeignet sein die Präsenz von Hydratphasen in Peridotiten in grosser Tiefe festzustellen.